

Е. В. Волхонская, Е. В. Коротей, К. В. Власова

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРАВЛЕННЫХ СВОЙСТВ ОДНОЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ С ДВУХДИАПАЗОННЫМ ЛОГОПЕРИОДИЧЕСКИМ ОБЛУЧАТЕЛЕМ В СРЕДЕ MathCAD

88

Приведены результаты оптимизации геометрических параметров однозеркальной антенны с двухдиапазонным логопериодическим облучателем и исследования ее диапазонных свойств в среде MathCAD. Используемая авторами модель поля излучения зеркальной антенны построена на базе методов поверхностных токов и наведенных ЭДС, а также теории цепей с распределенными параметрами. Результаты исследований показали адекватность построенной модели и соответствие направленных свойств зеркальной антенны предъявляемым к ним требованиям.

The results of single-mirror antenna with a dual-band log-periodic irradiator geometric parameters optimization and model researches of it's range properties in MathCAD are presented in this article. The model of the mirror antenna radiation field used by the authors is based on the base of the surface currents method, the method of induced EMFs and theory of electric circuits with distributed parameters. The results of the research showed the adequacy of the constructed model and the compliance of the directional properties of the mirror antenna with the requirements imposed on them.

Ключевые слова: зеркальная антенна, логопериодическая антенна, двухдиапазонный облучатель, характеристики излучения.

Keywords: mirrorantenna, log-periodic antenna, dual-band irradiator, radiation characteristics.

Введение

Развитие телекоммуникационных технологий приводит к непрерывному расширению спектра предоставляемых услуг в области передачи голосовых сообщений и данных, доступа в интернет, телевизионного вещания, навигационных услуг и прочего. По состоянию на 2019 г. на геостационарной орбите было задействовано 379 активных спутников связи, имеющих транспондеры, функционирующие в диапазонах L, S, C, X, Ku и Ka. В 2020–2022 гг. запланирован ввод в эксплуатацию еще 28 спутников [1].

Увеличение числа спутников-ретрансляторов приводит к необходимости решать задачу пространственного разделения данных источников сигналов, а значит, к необходимости уменьшения ширины диаграммы направленности антенны по мере перехода на более высокочастотные диапазоны Ku и Ka [2].



Порядка 10 % всех активных спутников-ретрансляторов одновременно функционируют в нескольких частотных диапазонах. Необходимость одновременного приема сигналов нескольких частотных диапазонов делает актуальной задачу синтеза многодиапазонных облучателей зеркальных антенн. Традиционные облучатели зеркальных антенн представляют собой рупорные или логопериодические антенны. Проведенный анализ технических решений таких облучателей показал, что совмещение нескольких частотных диапазонов в рамках единой конструкции, как правило, приводит либо к серьезному усложнению конструкции [3], либо к непостоянству направленных свойств [4].

Конструкция облучателя

В рамках проводимой авторами статьи НИОКР «Разработка электродинамических моделей облучателей больших зеркальных антенн в составе системы ГМССБ для исследования качества решения задач спутниковой радиосвязи и радионавигации» была предложена конструкция логопериодической антенны, функционирующей в смежных диапазонах частот С и Х (рис. 1). Прототипом конструкции данной антенны послужила микрополосковая логопериодическая антенна С-диапазона [5].

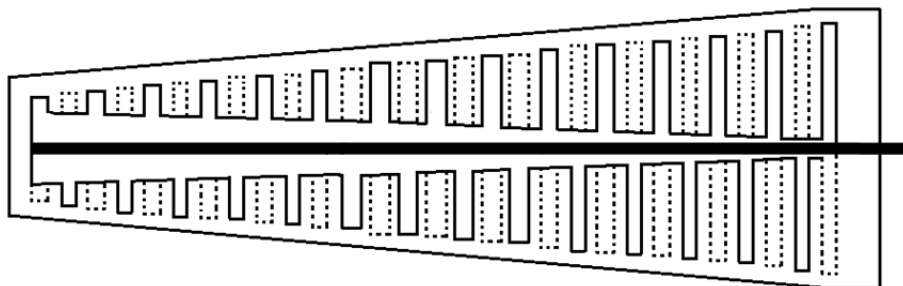


Рис. 1. Конструктивное исполнение двухдиапазонного логопериодического облучателя, функционирующего в С и Х диапазонах

Конструкция такого облучателя была оптимизирована с применением алгоритма, реализованного в работе [6]. Исследование направленных свойств и электрических параметров данной антенны показало относительную стабильность характеристик в пределах всего рабочего диапазона частот. Ниже, на рисунках 2 и 3, приведены диаграмма направленности (ДН) и частотные зависимости активной и реактивной составляющих входного сопротивления, коэффициента стоячей волны (КСВ) в коаксиальном фидере, ширины ДН антенны, максимального относительного уровня боковых лепестков (УБЛ) ДН и коэффициента направленного действия (КНД) антенны в двух главных плоскостях.

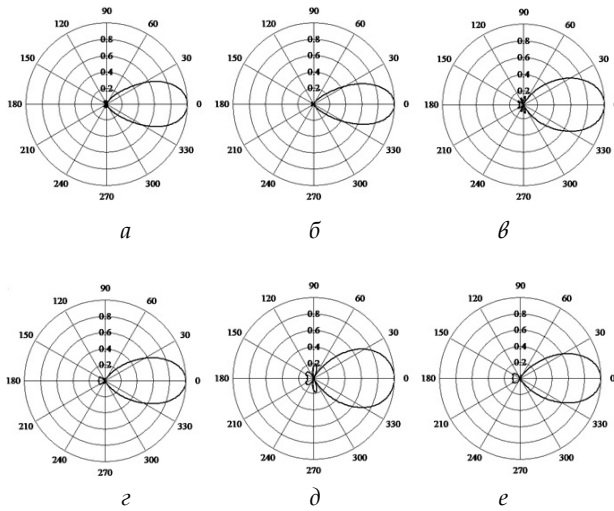


Рис. 2. Нормированная ДН логопериодического облучателя для рабочих частот 5,721 ГГц (*a*, *б*), 7,185 ГГц (*в*, *г*) и 8,364 ГГц (*д*, *е*) в плоскостях, содержащей излучающие элементы (*a*, *в*, *д*) и перпендикулярной им (*б*, *г*, *е*)

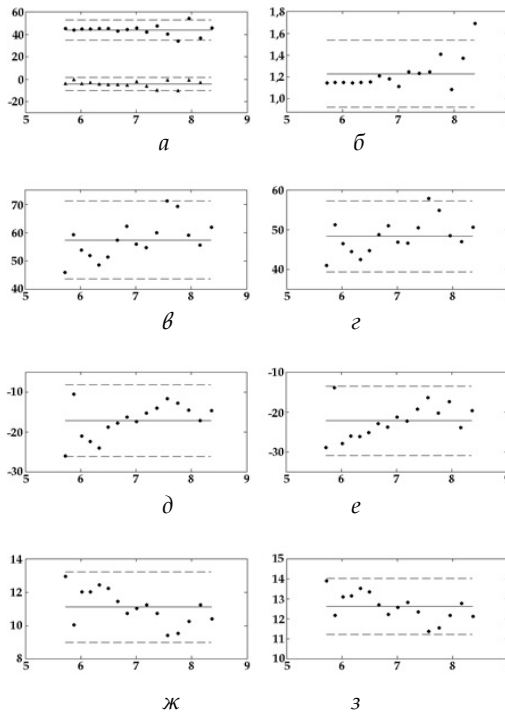


Рис. 3. Частотные зависимости активной и реактивной частей входного сопротивления, Ом (*a*), КСВ в питающем фидере (*б*), ширины ДН, градусы (*в*, *г*), максимального относительного УБЛ, дБ (*д*, *е*) и КНД, дБи (*ж*, *з*) в плоскости, содержащей элементы антенны (*в*, *д*, *ж*) и перпендикулярной им (*г*, *е*, *з*). По оси абсцисс отложены значения рабочей частоты в ГГц



Оптимизация конструкции зеркальной антенны

В работе проведена оптимизация конструктивных параметров однозеркальной антенны с выбранным двухдиапазонным логопериодическим облучателем в соответствии с процедурой оптимизации, описанной в работе [7].

В качестве оптимизируемых конструктивных параметров были выбраны радиус раскрыва зеркала (рефлектора) и его фокусное расстояние. В качестве исходных данных выбраны:

- 1) диапазон изменения радиуса рефлектора – от 1 до 4 м;
- 2) диапазон изменения фокусного расстояния рефлектора – от 2 до 6 м;
- 3) рабочая частота $f = 8,364$ ГГц.

Результаты исследования направленных свойств однозеркальной антенны при изменении фокусного расстояния зеркала приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты оптимизации фокусного расстояния зеркала при $R_0 = 3$ м

f_0 , м	$\Delta\theta_{0,707}$, градусов	ξ , дБ	D , дБи	$\nu\chi$
2	0,433	-27,121	47,803	0,203
2,5	0,404	-26,600	48,226	0,221
3	0,389	-23,522	48,424	0,234
3,5	0,378	-21,921	48,652	0,237
4	0,372	-20,844	48,766	0,232
4,5	0,368	-20,096	48,848	0,214
5	0,364	-19,594	48,907	0,207
5,5	0,362	-19,237	48,953	0,186
6	0,360	-18,975	48,988	0,175

В соответствии с процедурой оптимизации, изложенной в [7], было выбрано оптимальное фокусное расстояние $f_0 = 3,5$ м, соответствующее наибольшему значению произведения коэффициента использования поверхности (КИП) рефлектора ν на эффективность облучения рефлектора χ , которые определяются выражениями вида

$$\nu = \left(\frac{\lambda}{2\pi R_0} \right)^2 \cdot D, \tag{1}$$

где λ – рабочая длина волны, м; R_0 – радиус раскрыва рефлектора, м; D – коэффициент направленного действия (КНД) зеркала, дБи;

$$D = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi |F(\theta, \varphi)|^2 \sin(\theta) d\theta d\varphi}, \tag{2}$$

где $F(\theta, \varphi)$ – нормированная пространственная амплитудная характеристика направленности зеркальной антенны; (θ, φ) – сферические углы в системе координат, совмещенных с фокусом рефлектора;



$$\chi = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{\max}} |F(\theta, \varphi)|^2 \sin(\theta) d\theta d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |F(\theta, \varphi)|^2 \sin(\theta) d\theta d\varphi}, \quad (3)$$

где θ_{\max} – угол, под которым видна кромка рефлектора из фокуса.

Результаты исследования направленных свойств однозеркальной антенны при изменении радиуса раскрыва зеркала при оптимальном фокусном расстоянии приведены в таблице 2.

В соответствии с аналогичным критерием был выбран оптимальный радиус раскрыва рефлектора $R_0 = 1,75$ м.

Таблица 2

Результаты оптимизации радиуса раскрыва зеркала при $f_0 = 3,5$ м

R_0 , м	$\Delta\theta_{0,707}$, градусов	ξ , дБ	D , дБи	$\nu:\chi$
1	1,061	-18,024	44,959	0,264
1,25	0,853	-18,290	46,881	0,364
1,5	0,716	-18,620	48,448	0,467
1,7	0,635	-18,885	49,521	0,567
1,75	0,617	-18,969	49,768	0,615
1,8	0,601	-19,085	49,992	0,612
2	0,545	-19,402	49,144	0,466
2,5	0,444	-20,564	48,243	0,287
3	0,378	-21,921	48,652	0,237
3,5	0,332	-23,653	49,249	0,205
4	0,299	-25,635	48,840	0,143

Модельные исследования

На последнем этапе работы проведены модельные исследования направленных свойств зеркальной антенны в пределах рабочего диапазона частот облучателя, охватывающего С- и Х-диапазоны.

Результаты исследования направленных свойств однозеркальной антенны при изменении рабочей частоты при оптимальных фокусном расстоянии и радиусе раскрыва приведены в таблице 3.

Таблица 3

Частотная зависимость параметров излучения зеркальной антенны с параметрами $R_0 = 1,75$ м, $f_0 = 3,5$ м

f , ГГц	$\Delta\theta_{0,707}$, градусов	ξ , дБ	D , дБи	χ
5,721	0,901	-18,875	46,482	0,804
5,868	0,881	-19,020	46,694	0,596
6,018	0,856	-18,836	46,922	0,760
6,173	0,836	-18,888	47,139	0,731
6,331	0,815	-18,912	47,356	0,763
6,493	0,795	-18,900	47,577	0,770



f , ГГц	$\Delta\theta_{0,707}$, градусов	ξ , дБ	D , дБи	χ
6,660	0,775	-18,909	47,796	0,715
6,831	0,756	-18,946	48,013	0,642
7,006	0,739	-19,077	48,227	0,642
7,185	0,719	-18,976	48,451	0,673
7,370	0,701	-18,974	48,670	0,652
7,559	0,685	-19,105	48,882	0,559
7,752	0,666	-18,984	49,109	0,549
7,951	0,650	-18,998	49,329	0,575
8,155	0,635	-19,068	49,544	0,675
8,364	0,617	-18,969	49,768	0,609

В соответствии с полученными результатами построены частотные зависимости ширины ДН, максимального относительного УБЛ, КНД и эффективности облучения рефлектора. Эти зависимости приведены на рисунке 4, где точками отмечены модельные результаты, а сплошными линиями – критические значения данных параметров, рассчитанные в соответствии с требованиями, предъявляемыми к характеристикам зеркальных антенн земных станций спутниковой связи [8].

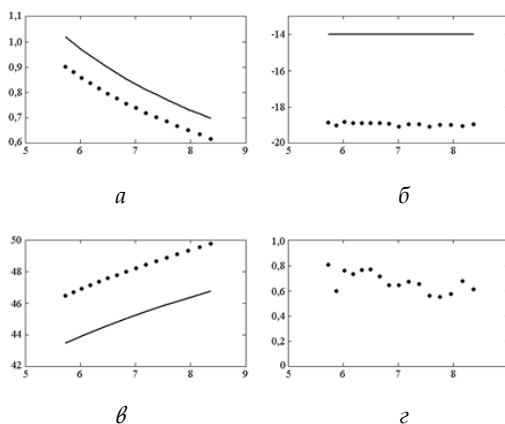


Рис. 4. Частотные зависимости:
a – ширины ДН, градусов; *б* – максимального относительного УБЛ, дБ;
в – КНД, дБи; *г* – эффективности облучения рефлектора
 (по оси абсцисс отложены значения рабочей частоты в ГГц)

Из приведенных зависимостей видно, что ширина ДН зеркальной антенны не превосходит максимально допустимого значения, определяемого выражением [8]

$$\Delta\theta_{\max} = \frac{68 \cdot \lambda}{2R_0} \tag{4}$$

в пределах всего рабочего диапазона частот.



Требование к максимальному относительному УБЛ (не должен превышать -14 дБ) выполняется с большим запасом. Также можно отметить существенную разницу в модельных и критических значениях КНД порядка 3 дБ, благодаря чему значение КНД всегда выше минимально допустимого, определяемого выражением вида

$$D_{\min} = 20 \cdot \lg \left(\frac{2R_0}{\lambda} \right) + 7. \quad (5)$$

Что касается полученных значений эффективности облучения рефлектора, то они лежат в диапазоне от 0,6 до 0,8. В случае использования зеркальной антенны в режиме передачи это привело бы к переливу излучаемой энергии за кромку зеркала и, соответственно, к уменьшению коэффициента усиления зеркальной антенны на величину порядка 5–15 % [8]. Однако примененный в составе конструкции логопериодический облучатель микрополоскового исполнения находит применение только в режиме приема, когда уровень принимаемых сигналов мал. В режиме приема данный эффект может привести к приему шумов земной поверхности и атмосферы, однако в диапазоне СВЧ эти шумы существенно меньше собственных шумов антенной системы.

Заключение

Проведенные модельные исследования направленных свойств односторонней параболической антенны с разработанным двухдиапазонным логопериодическим облучателем показали, что антенная система исправно функционирует во всем рабочем диапазоне частот, а ее параметры излучения находятся в пределах допустимых значений.

Исследование выполнено в рамках государственного задания на выполнение НИОКР «Разработка электродинамических моделей облучателей больших зеркальных антенн в составе системы ГМССБ для исследования качества решения задач спутниковой радиосвязи и радионавигации», приказ № 279-л от 21.04.2020 г.

Список литературы

1. SATBEAMS. URL: <https://www.satbeams.com/satellites> (дата обращения: 05.09.2020).
2. Волхонская Е. В., Коротей Е. В. Разработка математической модели поля излучения двухзеркальной антенны Грегори в рамках метода поверхностных токов // Морские интеллектуальные технологии : тр. VII междунар. Балтийского морского форума. Вып. 4 (46). Калининград, 2019. Т. 2. С. 188–193.
3. Двухдиапазонный облучатель с комбинированным преобразователем мод : пат. RU 2680424 C1 МПК H01Q 5/00 (2015.01) Рос. Федерация. № 2018102630 ; заявл. 23.01.2018.
4. Сверхширокополосная логопериодическая антенна : пат. RU 2663264 C2 МПК H01Q 11/00 (2006.01) Рос. Федерация. № 2017101490 ; заявл. 17.01.2017.
5. Микрополосковая логопериодическая антенна : пат. RU 2571607 C1, МПК H01Q 10/11 (2006.01) Рос. Федерация. № 2014129990/08 ; заявл. 21.07.2014.
6. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015619811 Российская Федерация. Оптимизация геометрических парамет-



ров логопериодической антенны микрополоскового исполнения для С и Ку диапазонов / Е. В. Коротей, Е. В. Волхонская, Д. В. Кужекин. № 2015615296 : заявл. 15.09.2015 ; опубл. 20.10.2015.

7. Волхонская Е. В., Коротей Е. В., Скридлевский А. В. Оптимизация конструкции двухзеркальной антенны Грегори с логопериодическим облучателем Ку-диапазона для повышения качества решения задач спутниковой связи // Радиотехника. 2020. № 2 (4). С. 3–15.

8. Фролов О. П., Вальд В. П. Антенны для земных станций спутниковой связи. М., 2008.

Об авторах

Елена Вячеславовна Волхонская — д-р техн. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: volkhonskaya_e@mail.ru

Евгений Владимирович Коротей — ст. преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: eugeny_korotey@mail.ru

Ксения Валерьевна Власова — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, Россия.

E-mail: p_ksenia@mail.ru

The authors

Prof. Elena V. Volkhonskaya, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: volkhonskaya_e@mail.ru

Evgeny V. Korotey, Assistant Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: eugeny_korotey@mail.ru

Dr Kseniya V. Vlasova, Associate Professor, Baltic Fishing Fleet State Academy, Russia.

E-mail: p_ksenia@mail.ru